УДК 537.523/.527; 621.35.035

ИМПУЛЬСНЫЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД КАК МЕТОД ОБРАБОТКИ ВОДЫ: АКТИВНЫЕ ЧАСТИЦЫ-ОКИСЛИТЕЛИ В ВОДО-ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Н.А. Яворовский, Я.И. Корнев, С.В. Прейс*, С.С. Пельцман, М.Б. Хаскельберг, Б.Н. Чен

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета
E-mail: jahivolt@mail.tomsknet.ru
*Lapeenranta Technical University, Lapeenranta, Finland
E-mail: sergei.preis@lut.fi

Выполнены экспериментальные исследования импульсного барьерного разряда в водо-воздушном капельном потоке. Определены основные продукты разряда, обусловливающие очистку воды. Показано, что разряд преимущественно развивается вблизи поверхности воды, что повышает эффективность использования образующихся в разряде короткоживущих частиц.

Введение

Высокая степень загрязненности поверхностных и подземных вод и растущие требования к качеству воды обусловливают значительную потребность в системах водоочистки, которые были бы эффективны, просты в эксплуатации и не приводили бы, в конечном итоге, к загрязнению природной среды, вследствие использования токсичных химических реагентов.

Среди экологически чистых водоочистных технологий широкое распространение получило озонирование. Озон является сильным окислителем, который в промышленных масштабах производится из воздуха или кислорода с помощью электрического разряда. Озонирование имеет ряд недостатков, основным из которых является неэффективное использование энергии. Синтез озона в электрическом разряде является обратимой реакцией, при этом значительная часть энергии теряется на поддержание равновесия между озоном и кислородом [1, 2]. Из-за малой растворимости озона в воде необходимы установки, увеличивающие время контакта озона с водой, габариты которых могут быть весьма значительными. Еще более усложняет систему необходимость осушения подаваемого в озонатор воздуха.

Озон разлагается в воде с образованием сильного окислителя – гидроксильного радикала (OH), который, в отличие от молекулярного озона, способен разрушать многие токсичные органические соединения [3]. Однако для производства одного радикала OH требуются две молекулы озона. Часть радикалов OH рекомбинирует и реагирует с ионами минеральных примесей [4].

В зоне электрического разряда также образуются короткоживущие частицы: свободные радикалы, ионы и электроны, многие из которых могут играть важную роль в процессах очистки воды, однако, из-за малого времени жизни большая их часть бесполезно теряется и не покидает зоны разряда. Озон лишь частично запасает и доставляет в воду энергию этих частиц.

Для снижения энергозатрат желательно обеспечить генерацию активных частиц в обрабатываемой воде, что может быть достигнуто в случае непосредственного контакта воды и плазмы электрического разряда. Начальный этап исследований в этом направлении связан с использованием импульсных разрядов в воде [5]. Эти исследования продолжаются и в настоящее время [6, 7]. Показано, что разряд в воде вызывает обеззараживание и разложение растворенных органических соединений [8, 9], при этом может быть очищена как питьевая, так и сточная вода [10, 11]. Основным недостатком метода является достаточно низкая эффективность использования энергии [12, 13]. При искровом разряде в воде возникают излучение, ударные волны, кавитация, электролизные явления и локальный нагрев. При этом только часть затраченной энергии оказывается эффективной при удалении целевых загрязнений. Например, дезинфекция происходит, в основном, благодаря ультрафиолетовому излучению (70...90 %), вклад ударных волн составляет 20...40 %, а остальные явления, сопровождающие разряд, практически бесполезны [14]. В работе [15] также показано, что обеззараживающий эффект практически полностью обусловлен УФ-излучением. Таким образом, большая часть энергии искрового разряда в воде расходуется бесполезно [16] – метод не способен конкурировать с озонированием.

В последние годы выполнен ряд исследований импульсного барьерного разряда (ИБР) в газе с длительностью импульса напряжения 50...300 нс [17, 18]. Такой разряд оказался эффективным способом генерации OH-радикалов в воздухе, содержащем пары воды [19]:

$$e^{-}+H_2O \rightarrow e^{-}+H+OH \quad (1)$$

$$O(^1D)+H_2O \rightarrow 2OH \quad (2)$$

Данные этих исследований позволяют заключить, что ИБР является перспективным способом окисления органических и неорганических загрязнений в воздухе [20, 21] и аэрозолях [22]. Концентрация радикалов OH в зоне разряда может существенно превышать концентрацию озона [17, 23]. Повышенная влажность газа затрудняет образование озона и ускоряет образование OH-радикалов [17].

Время жизни OH-радикалов в воздухе составляет несколько сотен микросекунд [23]. Концентрация OH после разряда составляет $10^{14}...10^{15}$ см$^{-3}$. Максимум концентрации достигается через 30...50 мкс по окончании импульса напряжения, что делает возможным перевод радикалов из газовой фазы в воду с последующим окислением растворенных в воде загрязнений.

В наших предыдущих работах для очистки воды использован импульсный барьерный разряд в водовоздушном потоке, созданном путем диспергирования воды в воздухе на капли диаметром порядка нескольких миллиметров. Были эффективно удалены некоторые минеральные (ионы железа и марганца) и органические (фенол и трихлорэтилен) примеси. Импульсный барьерный разряд в водовоздушном потоке успешно применен в установке промышленного масштаба для очистки и обеззараживания питьевой воды [24, 25]. Для совершенствования электроразрядного метода необходимо более детальное изучение барьерного разряда в воздухе при наличии капель воды с целью определения основных продуктов разряда и изучения выхода этих продуктов в зависимости от параметров разряда.

Экспериментальная установка и методики измерений

Экспериментальная установка. Система электроразрядной обработки воды состояла из реактора (рис. 1, *а*) и импульсного источника питания. В экспериментах был использован реактор из нержавеющей стали сечением 10×10 см. Вода, поступающая в реактор, диспергировалась в воздухе на капли при помощи горизонтальной перегородки с отверстиями диаметром 1 мм, расположенной на высоте 0,3 м над системой электродов. В результате формировался полидисперсный водо-воздушный поток с диаметром капель 1...2 мм. Капли воды, падающие на систему электродов, подвергались воздействию разряда (рис. 1, *б*). Объемная скорость потока воды через реактор составляла от 0,1 до 0,7 м^3/ч, скорость встречного потока воздуха – от 0,1 до 1,5 м^3/ч.

Разряд создавался между цилиндрическими электродами, которые изолировались друг от друга при помощи диэлектрических барьеров. В качестве барьеров использовались кварцевые трубки внешним диаметром 5 мм и толщиной стенки 1 мм. Расстояние между диэлектрическими барьерами составляло 3 мм. Напряжение подавалось на систему электродов от магнитотиристорного генератора импульсов. Длительность фронта напряжения на выходе генератора 150 нс, общая длительность импульса от 400 до 800 нс. Амплитуда напряжения 15...30 кВ, частота следования импульсов 1000 с$^{-1}$.

Методики измерений. Для изучения барьерного разряда в водо-воздушной среде были выполнены электрические и оптические исследования, а также измерения концентрации озона. Ток и напряжение регистрировались с помощью токового шунта и емкостного делителя напряжения. Для регистрации осциллограмм применялся осциллограф Tektronix TDS-220 с полосой пропускания 100 МГц. По осциллограммам тока и напряжения определялась энергия, выделившаяся в межэлектродном промежутке.

В экспериментах получены фотографии свечения и эмиссионные спектры разряда. Для проведения спектральных исследований использовался монохроматор МДР-2 (ЛОМО, Россия) и фотоэлектронные умножители (ФЭУ) с областью чувствительности 200...800 нм. Полученное в экспериментах спектральное разрешение $\Delta\lambda$=0,5 нм.

Концентрация озона в воздухе на выходе из реактора измерялась газоанализаторами «Озон-5» (Россия) и «EC-2001» (Япония). Содержание озона в воде определялась йодометрическим методом. Концентрация нитрат-ионов в обработанной раз-

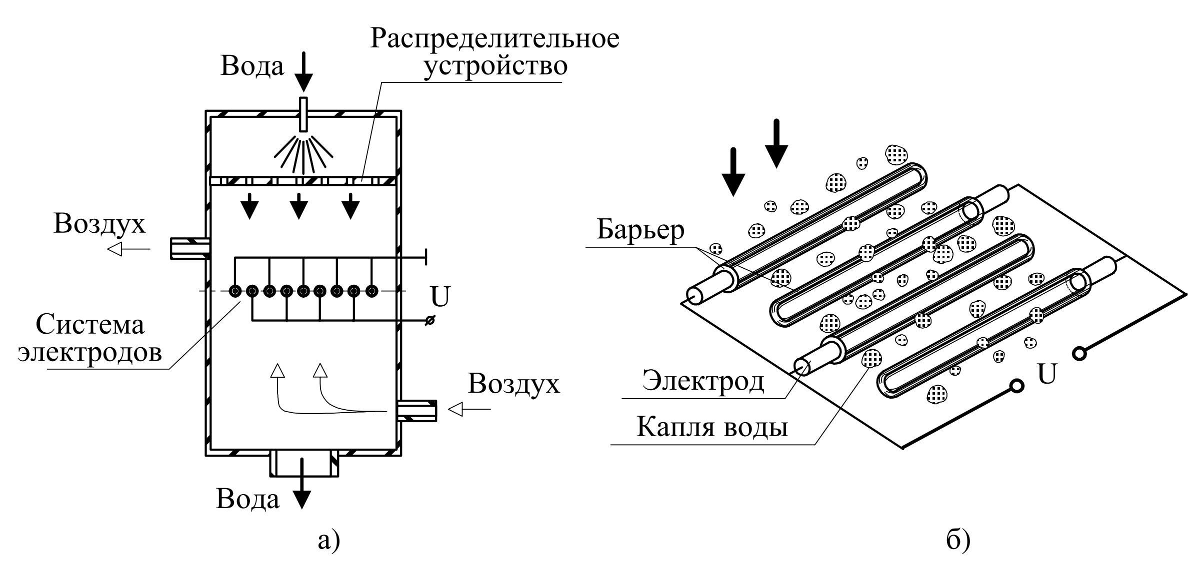


Рис. 1. *Реактор (а) и система электродов барьерного разряда в водо-водушной среде (б)*

рядом воде определялась колориметрическим методом, в реакции нитрат ионов с фенолдисульфоновой кислотой (ГОСТ 18826-73).

Результаты экспериментов

Электрические характеристики разряда. Осциллограммы тока и напряжения, полученные при различных скоростях потока воды, показаны на рис. 2. Зажигание разряда во всех случаях сопровождалось заметным увеличением тока через электродную систему. Пик на осциллограмме тока фиксировался при достижении напряжением порога зажигания, что соответствует резкому росту проводимости из-за возникновения разрядных каналов. Зажигание разряда также сопровождалось возникновением свечения разряда и появлением озона в газе на выходе из реактора.

Электрические параметры разряда в водо-воздушной среде отличались от соответствующих характеристик в воздухе. Напряжение зажигания разряда снижалось с 25 кВ в воздухе до 14...16 кВ в водо-воздушной среде. При увеличении объемной скорости потока воды с 0,0 до 0,36 м^3/ч активное энерговыделение в разрядном промежутке для импульса напряжения амплитудой 27 кВ возрастало с 42 до 60 мДж/импульс. Изменение скорости потока воздуха не оказывало влияние на электрические параметры.

Оптические характеристики разряда. Визуально барьерный разряд в водо-воздушной среде представляет собой совокупность отдельных низкоинтенсивных светящихся каналов – микроразрядов (см. фотографии на рис. 3). Плотность микроразрядов по длине электродов составляла 3...5 см$^{-1}$. Наиболее яркое свечение разряда наблюдалось в воздухе вблизи капель воды и у поверхности раздела фаз вода-воздух (рис. 3, *а*). При замыкании межэлектродного промежутка водой свечение разряда в области перемычки отсутствовало (рис. 3, *б*).

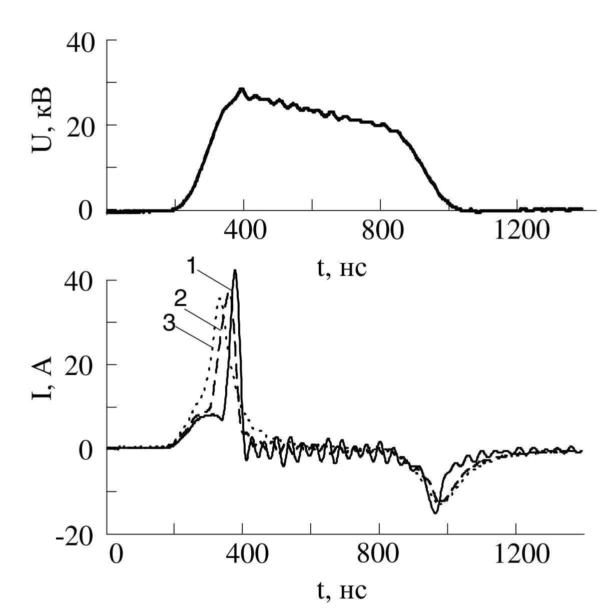
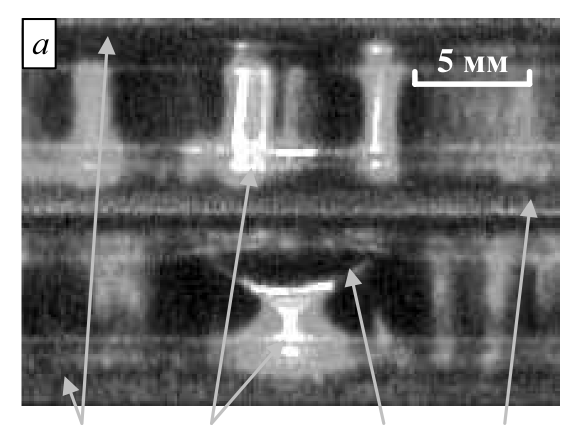


Рис. 2. *Осциллограммы тока и напряжения при разных объемных скоростях потока воды: 1) 0,0; 2) 0,36; 3) 0,6 м^3/ч*

Эмиссионный спектр импульсного барьерного разряда в водо-воздушной среде состоит из полос испускания молекулярного азота и гидроксильных радикалов [26]. Большинство полос сосредоточено в диапазоне длин волн 290...490 нм.

Наиболее сильные полосы испускания принадлежат ко второй положительной системе N_2: переход $N_2(C^3\Pi_U,v')\rightarrow N_2(B^3\Pi_g,v'')$, длины волн 316,0, 337,1, 357,7 и 380,75 нм. Увеличение амплитуды напряжения выше 18 кВ сопровождалось появлением слабой линии иона азота с длиной волны 391,4 нм (переход $N_2^+(B^2\Sigma_U,v')\rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g,v'')$, первая отрицательная система N_2^+). При повышении амплитуды напряжения до 25...26 кВ в спектре появлялись слабые полосы испускания γ-системы оксида азота NO, λ=236,3 нм (рис. 4, *а*).



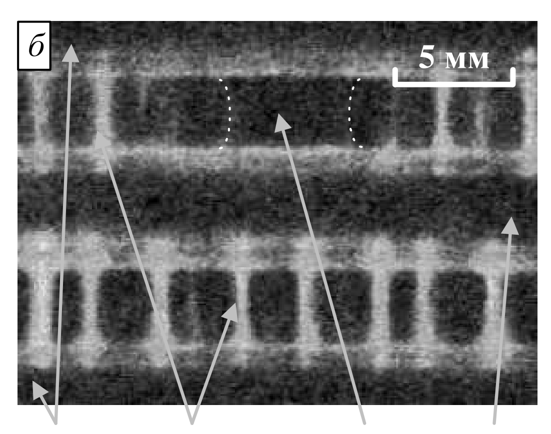


Рис. 3. *Барьерный разряд в воздухе при наличии капель воды: локализация разряда вблизи капли (а) и замыкание межэлектродного промежутка каплей воды (б)*

В диапазоне длин волн 292...299 и 310...316 нм обнаружены полосы испускания OH-радикалов, переход $OH(A^2\Sigma^+) \rightarrow OH(X^2\Pi)$. Интенсивность свечения в полосе OH (λ=310,8 нм) линейно возрастает с повышением амплитуды напряжения.

Концентрация нитрат-ионов (NO_3^-) в обработанной разрядом воде составляла 0,1...0,2 мг/л, что близко к порогу обнаружения. Для повышения достоверности измерений вода объемом 10 л подвергалась электроразрядной обработке в течение 30 мин с объемной скоростью потока воды 0,36 $м^3$/ч. Концентрация NO_3^- линейно повышалась с увеличением времени обработки и составляла 1...5 мг/л в зависимости от приложенного напряжения. Энергетический выход нитрат-ионов составлял 0,65...0,72 г/кВт·ч при напряжениях 22...24 кВ, и 1,1...1,4 г/кВт·ч при напряжениях 28...29 кВ.

Концентрация озона в водо-воздушной среде в несколько раз ниже концентрации озона в воздухе. В условиях эксперимента энергозатраты на производство озона в воздухе влажностью 25 % составили 10...14 кВт-ч/кг при концентрации озона 5...9 мг/л. При переходе к разряду в водо-воздушном потоке концентрация озона в воздухе на выходе из реактора заметно снижалась. Энергозатраты на производство озона составили 40...70 кВт·ч/кг. При повышении амплитуды напряжения зависимость концентрации озона от напряжения испытывала насыщение при концентрации озона порядка 1,5 мг/л (рис. 4, *б*). Концентрация озона в обработанной разрядом воде составляла 0,1–0,2 мг/л.

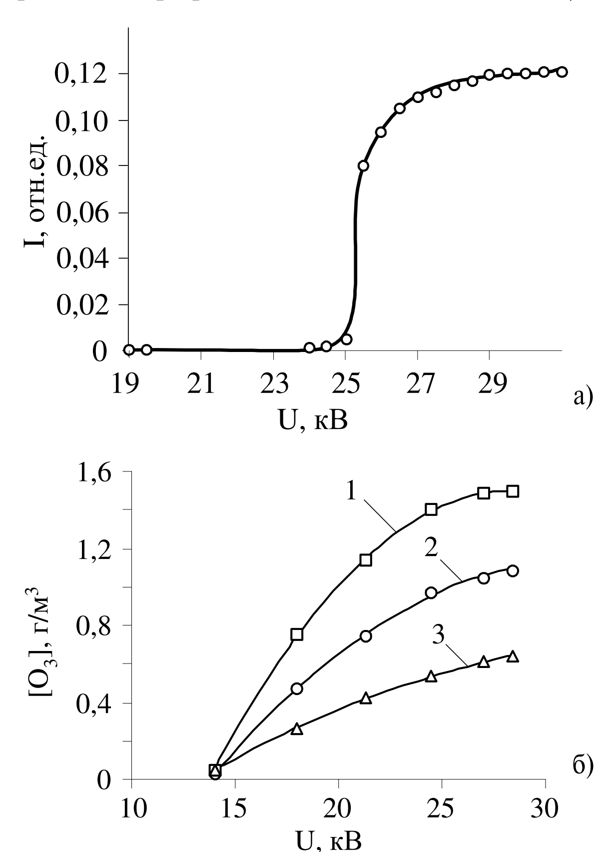


Рис. 4. *Зависимость: а) интенсивности излучения NO λ=236,3 нм от приложенного напряжения, б) концентрации озона от приложенного напряжения. Скорость потока воздуха: 1) 0,3, 2) 0,62, 3) 1,2 $м^3$/ч*

Обсуждение

Параметры обработки воды. Процесс очистки воды с помощью ИБР может быть разделен на три основные стадии: 1) образование активных частиц OH, O и O_3 в газовой фазе, 2) транспортировка этих частиц к целевым загрязнениям, растворенным в воде, и 3) реакции окислителей с молекулами загрязнений. Для уменьшения потерь активных частиц в газовой и жидкой фазе время диффузии активных частиц должно быть меньше, чем время их жизни.

Теоретически, повышение абсорбции активных частиц в зоне разряда возможно путем создания турбулентности и развитой поверхности контакта в водо-возушном потоке. Время жизни OH-радикалов в озоно-воздушной смеси, определенное экспериментально [17, 27], составляет 0,1...0,3 мс, радиус диффузии OH-радикалов – порядка диаметра микроразряда [17]. При максимальной линейной скорости потока воздуха 0,1 м/с OH-радикалы за время жизни переносятся на расстояние не более 30 мкм, при этом их концентрация снижается бо-

лее чем в 10 раз. Поэтому движение воздуха не может вносить существенный вклад в процессы массопереноса OH-радикалов. Для переноса в воду радикалы должны создаваться в непосредственной близости от поверхности воды.

Экспериментальные наблюдения показывают, что разряд зажигается вблизи находящихся в межэлектродном промежутке капель воды. На это указывают и результаты численного моделирования электрического поля в водо-воздушной среде, выполненные в работе [28]. Благодаря высокой относительной диэлектрической проницаемости воды, в объеме газа, окружающем каплю, происходит увеличение напряженности электрического поля. Разряд возникает в областях с наибольшей напряженностью поля, при этом канал разряда контактирует с поверхностью капли воды.

При замыкании же межэлектродного промежутка каплей воды, практически все напряжение прикладывается к диэлектрическим барьерам и напряженность поля на поверхности капли снижается до значений менее 1,5 кВ/см, что ниже порога зажигания разряда. Это согласуется с фотографиями свечения разряда, которые показывают отсутствие свечения на поверхности и внутри водяных «мостиков» (рис. 4, б).

Образование оксидов азота. При анализе образования азотсодержащих частиц в системах очистки питьевой воды необходимо принимать во внимание, что энергозатраты на обработку 1 $м^3$ воды составляют 50...100 Вт·ч [24, 25]. В этом случае образование азотсодержащих продуктов не может заметно сказываться на качестве воды. При обработке сточных вод вынужденное повышение энергозатрат приводит к увеличению скорости образования NO_x. В этом случае увеличение выхода нитрат-ионов и резкий рост интенсивности свечения в полосе 236,3 нм NO, наблюдаемый при повышении напряжения (рис. 4, *б*) требует внимания для уменьшения вторичного загрязнения воды нитратами. Если оксид азота (NO) образуется в зоне разряда, его возбуждение происходит в соответствии с уравнениями:

$$NO+N_2(A^2\Sigma_u^+)\rightarrow NO(A^2\Sigma^+)+N_2(X^2\Sigma^+) \qquad (3)$$

$$NO+e^{-*}\rightarrow NO(A^2\Sigma^+)+e^- \qquad (4)$$

Реакция (3) играет существенную роль в импульсном коронном разряде при атмосферном давлении [29]. Процессы с участием электронов также могут иметь место, поскольку пороговая энергия электронов в реакции (4) составляет 5,6 эВ, что ниже порога возбуждения $N_2(C^3\Pi_U)$ и $N_2^+(B^3\Sigma_U)$, линии испускания которых наблюдаются в спектре разряда.

В присутствии активных частиц-окислителей оксид азота (NO) может быть преобразован в NO_2 и, в присутствии OH радикалов, в азотную кислоту HNO_3. Действие данного механизма подтверждается присутствием в обработанной воде нитрат-ионов. Повышение удельной энергии и температуры в зоне разряда также может приводить к росту производства NO_x и снижению эффективности генерации озона [30]. Известно, что скорость большинства реакций с участием оксидов азота при повышении температуры существенно возрастает. Тем не менее, существенного повышения температуры газа на выходе из реактора в экспериментах не наблюдалось: рост температуры не превышал 1...2 °С.

Значительное влияние на производство активных частиц может оказывать увеличение энергии отдельных микроразрядов, при этом средняя температура газа в реакторе изменяется незначительно. В условиях ИБР в водо-воздушном потоке данный эффект может усиливаться за счёт привязки микроразрядов к каплям воды. Экспериментальные наблюдения показывают, что при повышении напряжения до 27...30 кВ «привязка» разряда к определенным точкам межэлектродного промежутка становится еще более выраженной (новые каналы возникают в следах предыдущих микроразрядов), снижается эффективность генерации озона (рис. 4, *б*). Таким образом, локальное повышение плотности энергии может приводить к повышению температуры и концентрации возбужденных частиц в микроразрядах и увеличению выхода оксидов азота.

Заключение

Электрические параметры импульсного барьерного разряда в водо-воздушном потоке отличаются от характеристик разряда в воздухе. В водо-воздушной среде наблюдается рост активной мощности и снижение напряжения зажигания разряда.

Энергетический выход нитрат-ионов в ИБР составляет 0,6...0,8 г/кВт·ч. При повышении приложенного к электродам напряжения выход азотсодержащих продуктов возрастает, что, вероятнее всего, вызвано повышением температуры и концентрации возбужденных частиц в каналах микроразрядов.

Проведенные исследования эмиссионных спектров разряда показывают, что разряд в водо-воздушной среде, является источником гидроксильных радикалов (OH). Высокий окислительный потенциал OH-радикалов делает электроразрядную обработку перспективным направлением, при условии перевода значительной части радикалов из газовой фазы в обрабатываемую воду.

Разряд в водо-воздушной среде зажигается преимущественно вблизи поверхности раздела фаз вода-воздух. Именно такой тип разряда и является наиболее предпочтительным для эффективного использования активных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Langlais B., Reckhow D., Brink D. Ozone in water treatment. Application and engineering. – Chelsea, England: Lewis Publ., 1991. – 558 p.
2. Motret O., Hibert C., Nikravech M., Gaurand I., Viladrosa R., Pouvesle J.M. Dependence of ozone generation efficiency on parameter adjustment in a triggered dielectric barrier discharge // Ozone: Sci. Eng. – 1998. – V. 20. – № 1. – P. 51–66.
3. Glaze W.H., Kang J.W., Chapin D.H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and UV-radiation // Ozone: Sci. Eng. – 1987. – V. 9. – № 4. – P. 335–352.
4. Hoigné J., Bader H. Role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solutions // Wat. Res. – 1976. – V. 10. – № 5. – P. 377–386.
5. Зыкина Л.Н., Голдаев В.С. Обеззараживание речной воды высоковольтными разрядами // Электронная обработка материалов. – 1974. – № 2. – С. 68–70.
6. Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Федюкович В.Н. Электроразрядный метод очистки воды. Состояние проблемы и перспективы // Известия академии наук: энергетика. – 1998. – № 1. – С. 40–55.
7. Chen Y.-S., Zhang X.-S., Dai Y.-C., Yuan W.-K. Pulsed high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution // Separation and Purification Technol. – 2004. –V. 34. – № 1–3. – P. 5–12.
8. Lubicki P., Jayaram S. High voltage pulse application for the destruction of the Gram-negative bacterium Yersinia enterocolitica // Bioelectrochem. Bioenergetics. – 1997. – V. 43. – № 1. – P. 135–141.
9. Sun B., Sato M., Clements J.S. Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – V. 32. – № 15. – P. 1908–1915.
10. Anpilov A., Barkhudarov E., Christofi N., Kop'ev V., Kossyi I., Taktakishvili M., Zadiraka Y. Pulsed high voltage electric discharge disinfection of microbially contaminated liquids // Lett. Appl. Microbiol. – 2002. – V. 35. – № 1. – P. 90–94.
11. Sugiarto A.T., Ito S., Ohshima T., Sato M., Skalny J.D. Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water // J. Electrostatics. – 2003. – V. 58. – № 1–2. – P. 135–145.
12. Grymonpré D.R., Finney W.C., Locke B.R. Aqueous-phase pulsed streamer corona reactor using suspended activated carbon particles for phenol oxidation: model-data comparison // Chem. Eng. Sci. – 1999. – V. 54 – № 15–16. – P. 3095–3105.
13. Sun B., Sato M., Clements J.S. Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – V. 32. – № 15. – P. 1908–1915.
14. Рязанов Н.Д., Перевязкина Е.Н. Действие обеззараживающих факторов импульсного электрического разряда в воде // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 2. – С. 43–45.
15. Ching W. K., Colussi A. J., Hoffmann M.R. Soluble sunscreens fully protect E-coli from disinfection by electrohydraulic discharges // Environ. Sci. Technol. – 2003. – V. 37 – № 21. – P. 4901–4904.
16. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 156 с.
17. Ono R., Oda T. Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy // J. Appl. Phys. – 2003. – V. 93. – № 10. – P. 5876–5882.
18. Watanabe S.T. Study on decay characteristics of OH radical density in pulsed discharge in Ar/H_2O // Jap. J. Appl. Phys. Part 1. – 2004. – V. 43. – № 1. – P. 315–320.
19. Ono R., Oda T. Measurement of hydroxyl radicals in an atmospheric pressure discharge plasma by using laser-induced fluorescence // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2000. – V. 36. – № 1. – P. 82–86.
20. Lee B.-Y., Park S.-H., Lee S.-Ch., Kang M., Choung S.-J. Decomposition of benzene by using a discharge plasma - photocatalyst hybrid system // Catalysis Today. – 2004. – № 93–95. – P. 769–776.
21. Roland U., Holzer F., Kopinke F.D. Improved oxidation of air pollutants in a non-thermal plasma // Catalysis Today. – 2002. – V. 73. – № 3–4. – P. 315–323.
22. Chauhan S., Yankelevich E., Bystritskii V., Wood T.K. Degradation of 2,4,5-trichlorophenol and 2,3,5,6-tetrachlorophenol by combining pulse electric discharge with bioremediation // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 1999. – V. 52. – №2. – P. 261–266.
23. Ono R., Oda T. Measurement of hydroxyl radicals in pulsed corona discharge // J. Electrostatics. – 2002. – V. 55. – № 3–4. – P. 333–342.
24. Пат. 2136600 РФ. МКИ[6] C02F 1/46, 7/00. Реактор и способ очистки воды / С.Г. Боев, В.М. Муратов, Н.П. Поляков, Н.А. Яворовский. Заяв. 16.12.97; Опубл. 10.09.99. Бюл. № 25. – 4 с.: ил.
25. Яворовский Н.А., Соколов В.Д., Сколубович Ю.Л., Ли И.С. Очистка воды с применением электроразрядной обработки // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 1. – С. 12–14.
26. Корнев Я.И. Яворовский Н.А., Иванов Г.Ф., Савельев Г.Г., Шаманская Т.В. Использование эмиссионных спектров для исследования барьерного разряда в водо-воздушной среде // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 78–82.
27. Hilbert C., Gaurand I., Motret O., Pouvesle J.M. [OH(X)] measurements by resonant absorption spectroscopy in a pulsed dielectric barrier discharge // J. Appl. Physics. – 1999. – V. 85 – № 10. – P. 7070–7075.
28. Корнев Я.И., Исаев Ю.Н., Ушаков В.Я., Хаскельберг М.Б., Яворовский Н.А., Колчанова Т.В. Влияние распределения электрических полей в реакторе на эффективность электроразрядной обработки воды // Известия вузов. Физика. –2004. – Т. 47. – № 10. – С. 89–96.
29. Ono R., Oda T. Nitrogen oxide *g*-band emission from primary and secondary streamers in pulsed positive corona discharge // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 97. – № 1. – art. № 013302
30. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.